

Peut-on ressusciter des espèces ?

par Vincent Devictor, sur l'Écoblog

Peut-on ressusciter des espèces disparues ? La question se pose, tant l'homme a une responsabilité dans l'érosion de la biodiversité. Tout dépend de la situation. S'il reste ne serait-ce que quelques individus, c'est non seulement possible, mais cela a été réalisé pour quelques espèces emblématiques.

L'oryx d'Arabie est une espèce d'antilope originaire de la péninsule arabique. La population sauvage a été anéantie au cours du XX^e siècle, jusqu'au dernier individu tué en 1972. On considéra alors l'espèce sauvage comme éteinte, les seuls individus restants vivant en captivité dans un zoo américain. Un projet de reproduction de l'espèce en vue de sa réintroduction dans la nature fut alors lancé en 1972. Il a permis de réintroduire l'espèce dans de nombreuses réserves du Moyen-Orient à partir de 1982.

La population sauvage d'oryx d'Arabie compterait aujourd'hui plus de 1 000 individus. Mais le braconnage reprenant et l'habitat naturel étant toujours sous pression, l'avenir de l'espèce dans la nature n'est pas garanti. La population captive (7 000 individus, dont certains aux zoos de Thoiry et de Montpellier) dépasse encore largement la population sauvage. Aujourd'hui, pourtant, cette espèce est seulement considérée comme « vulnérable ».

Mais peut-on réellement ressusciter une espèce quand il n'existe plus aucun individu vivant, même en captivité ? Certains chercheurs plaident en faveur de projets de « désextinction » – recréer des espèces éteintes pour pallier l'impact de l'homme sur la biodiversité.

Le pigeon migrateur est un exemple emblématique d'une telle entreprise. Cette espèce était l'un des oiseaux les plus abondants aux États-Unis. Causant des dommages agricoles, il fut massivement chassé, et le dernier individu s'est éteint en captivité en 1914. Or des spécimens en

bon état sont conservés dans les musées, et on peut récupérer leur ADN. Certains chercheurs proposent d'hybrider cet ADN avec celui de l'espèce la plus proche, le pigeon à queue barrée. L'idée serait de remplacer les allèles les plus significatifs de l'espèce encore vivante par ceux de l'espèce éteinte, pour créer des hybrides.

Des tentatives de reconstruire l'auroch, l'ancêtre des vaches d'aujourd'hui, ont ainsi été proposées dès 1950. Des espèces génétiquement « plus proches » de l'espèce



Martha, le dernier pigeon voyageur (ici empaillé), s'est éteint en captivité en 1914.

Carl Hansen, Smithsonian Institution

ancestrale ont été sélectionnées par croisements répétés. Nous n'avons toujours pas réussi à reconstituer un auroch, mais ces croisements ont permis d'aboutir à des individus dont le génotype est proche de ceux de l'espèce ancestrale.

Le clonage du dernier individu du bouquetin d'Espagne, dont le génome a été introduit dans un ovule de chèvre, a donné lieu à un embryon (mort dix minutes après sa naissance). Ce type de manipulation est considéré par certains comme le premier exemple de désextinction.

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'hybridation, des projets visant à produire des cellules sexuelles et *in fine* un œuf de l'espèce disparue à partir de cellules somatiques sont à l'étude. L'œuf serait ensuite

porté par une autre espèce : le pigeon voyageur pourrait être pondu par une poule !

Ce genre d'opération se heurte aux obstacles inhérents au clonage animal. Les embryons issus de ces opérations coûteuses sont en général non viables et obtenus après de multiples échecs. Les « succès » fascinent suffisamment pour faire oublier qu'il s'agit d'événements très rares et hasardeux.

Ces approches font aussi montre d'une vision réductionniste : le gène est vu comme une simple molécule, l'organisme comme une somme de gènes et l'espèce comme une somme d'individus. Obtenir un œuf ou un embryon viable est une chose, mais que signifie reproduire « l'écologie de l'espèce », le tissu d'interactions dans lesquelles elle est impliquée ?

Selon moi, la désextinction répond à un fantasme, celui de maîtriser l'existence des espèces ; et n'est pas une avancée vers la protection de la nature. Parler de désextinction est aussi une façon d'alléger la culpabilité environnementale qui nous angosse.

Soit. Mais cette approche de la conservation ne fait que rejouer une tendance ancienne : le recours aux promesses de la technique pour nous sortir d'un mauvais pas. La crise écologique a favorisé des nouveaux récits, au carrefour entre science et technologie, appliqués à la conservation de la biodiversité. La désextinction est l'un des multiples chapitres de ce récit. ■



Vincent DEVICTOR est chargé de recherche du CNRS en biologie de la conservation à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier. Il est l'auteur de l'Écoblog <http://www.scilogs.fr/ecoblog/>



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

L'intelligence des céphalopodes

Poulpes, seiches et calmars sont bien plus que les maîtres
du camouflage. Mémoire, apprentissage, innovation, jeux...
Dans de nombreux domaines, ils n'ont rien
à envier à certains vertébrés.

Ludovic DICKEL et Anne-Sophie DARMAILLACQ

© Corbis Images/Jens Büttner



L'ESSENTIEL

- Bien que leur cerveau soit très différent de celui des vertébrés, les céphalopodes présentent diverses capacités cognitives comparables.
- Dotés d'un système de camouflage élaboré, ils l'utilisent pour duper proies, prédateurs et rivaux.
- Ils adoptent aussi des comportements innovants ou de jeu, et mémorisent diverses informations.
- Les seiches apprennent même dès le stade embryonnaire en observant leur environnement à travers la membrane de l'œuf.

Ces animaux sont fantômes autant que monstres. Ils sont prouvés et improbables. Ils semblent appartenir à ce commencement d'êtres terribles que le songeur entrevoit confusément par le soupirail de la nuit.

Victor Hugo, Les travailleurs de la mer, 1866

J amais Victor Hugo n'aurait imaginé que, plus de deux siècles après qu'il eut décrit le combat de Gilliatt, pêcheur de Guernesey, contre ce « monstre », les citoyens européens considéreraient la pieuvre et ses cousins (seiches, calmars, nautilus) comme des êtres intelligents et sensibles. C'est pourtant bien ce que reflète la dernière mouture de la réglementation européenne sur l'expérimentation animale, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2013.

Désormais, la directive 2010/63/EU, qui définit les conditions selon lesquelles l'expérimentation animale peut être pratiquée dans l'Union européenne, inclut les céphalopodes. Une première mondiale. Ces mollusques cousins des gastéropodes (limaces, escargots) deviennent les seuls invertébrés sur lesquels l'expérimentation est strictement

1. LE POULPE FRANZ, dans l'aquarium de Timmendorfer Strand, en Allemagne. Comment un organisme sans squelette, ayant un système nerveux complexe, trois cœurs et huit bras perçoit-il le monde ?

■ LES AUTEURS



Ludovic DICKEL, professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie, y dirige le groupe Mémoire et plasticité comportementale.

Anne-Sophie DARMAILLACQ est maître de conférences au sein du même groupe.

réglementée (voir l'encadré page 25). Pour valider ses recherches, l'expérimentateur se doit, comme pour le singe, le chien ou le mouton, de respecter le bien-être de ces mollusques en mettant tout en œuvre pour éviter de leur causer souffrance, stress et détresse. Ces nouvelles dispositions éthiques illustrent-elles les signes d'un changement du comportement de l'homme vis-à-vis des « petites bêtes » (insectes, araignées, escargots...) ? Ou peut-être les céphalopodes se distinguent-ils des autres invertébrés par une forme d'intelligence ignorée jusqu'à présent ?

Depuis les années 1950, les comportements de ces animaux sont l'objet de recherches visant à répondre à cette question. Les seiches et les pieuvres sont les plus étudiés des céphalopodes. Les premiers travaux concernaient leur cerveau et, notamment, les structures cérébrales du poulpe (nom commun de la pieuvre *Octopus vulgaris*) impliquées dans l'apprentissage et la mémoire. Plus récemment, des biologistes de tous les continents se sont

intéressés à leurs spectaculaires capacités de changement de couleur et à leur système visuel perfectionné. Les recherches sont loin d'être terminées, mais, déjà, une conclusion s'impose : les céphalopodes sont dotés de capacités cognitives comparables à celles des vertébrés. Camouflage, vision, innovation, tromperie, apprentissage, mémoire, sont des facettes de leur intelligence.

Des spécimens les plus petits (*Idiosepius*, cinq millimètres) aux calmars géants (*Architeuthis sp.*, probablement long de plus de sept mètres), les céphalopodes ont colonisé l'ensemble des mers du globe. Certains se sont adaptés à l'obscurité des abysses, d'autres aux eaux polaires ou encore à la richesse des environnements coralliens. Les quelque 700 espèces de céphalopodes (voir l'encadré ci-dessous) ont toutes en commun d'être des mollusques marins. Prédateurs de coquillages, crustacés et poissons, proies prisées des cétacés et de certains oiseaux marins, elles présentent un répertoire comportemental parmi les plus riches et complexes du règne animal.

LE GROUPE DES CÉPHALOPODES

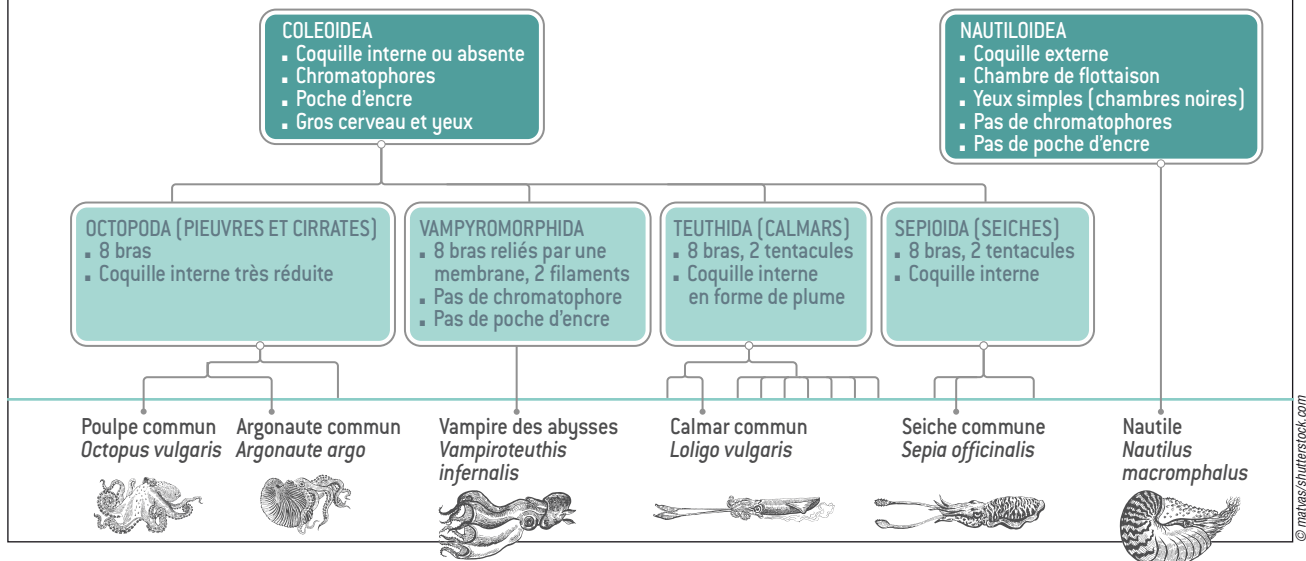
Les céphalopodes sont des mollusques qui ont perdu leur coquille (tel le poulpe) ou chez qui elle a évolué en un organe de flottabilité (telle la seiche) et en « squelette » sur lequel s'appuient les muscles puissants de leur manteau.

Ils ont en commun, entre autres, de se déplacer par rétro-propulsion en envoyant de l'eau

sous pression via un entonnoir ventral qu'ils peuvent orienter dans toutes les directions. Ce groupe est très ancien, bien plus que les poissons : les premiers fossiles de céphalopodes ont environ 500 millions d'années. Leurs ancêtres les plus connus, les ammonites, peuplaient l'ensemble de la planète au Trias et au Jurassique, il y a environ

200 millions d'années. La classe des céphalopodes actuels est subdivisée en Nautiloïdés (dont il ne reste qu'un seul genre, qui présente de nombreux caractères de ses ancêtres du Jurassique) et en Coléoïdés. Ces derniers sont représentés par des animaux ayant huit bras et deux longs tentacules : les Sépioïdés (les seiches, la sépiole...) et les

Theuthoïdés (les calmars). Les céphalopodes comptant huit bras tels le poulpe ou l'argonaute constituent l'ordre des Octopodes. Une seule espèce très étrange et rare occupe une place à part au sein des Coléoïdés, le « calmar venu des enfers » (*Vampyroteuthis infernalis*). Cette espèce relique a été observée dans les grandes profondeurs.



Ce répertoire, elles le doivent à une anatomie particulière.

Au cours de leur évolution, ces mollusques ont pour la plupart perdu leur coquille externe protectrice. Ils ont gagné des bras et des ventouses leur permettant de manipuler des objets avec précision – une capacité limitée par ailleurs à quelques mammifères terrestres tels que les primates ou la loutre. Leur peau peut changer de couleur instantanément. Nageurs efficaces, ils se propulsent en éjectant de l'eau sous pression par un entonnoir mobile situé sous leur ventre. Les déplacements fins sont assurés, chez les calmars et les seiches, par l'ondulation des nageoires qui courent de part et d'autre de leur corps.

Bras, ventouses, peau, entonnoir, nageoires sont contrôlés par un énorme cerveau. Ce dernier, le plus développé parmi les invertébrés, est comparable en taille à celui de certains oiseaux. Les 500 millions de cellules nerveuses du cerveau du poulpe (elles sont sans doute encore plus nombreuses chez la seiche) sont à comparer avec les 90 000 neurones du système nerveux des escargots et de la limace de mer (aplysie) ou aux 950 000 neurones du cerveau d'une abeille. Le poulpe a plus de neurones que le rat ou la souris (qui en comptent 100 à 200 millions), mais la comparaison s'arrête là, tant l'organisation du cerveau des céphalopodes diffère de celle des vertébrés.

Un cerveau dans un corps mou

Le cerveau des céphalopodes est situé entre les yeux et entoure... l'œsophage. Une capsule solide de cartilage le protège et fait office de «boîte crânienne». Leur cerveau est très structuré. Certaines régions fournissent des réponses motrices simples à des informations sensorielles simples; d'autres intègrent de multiples informations sensorielles et coordonnent des comportements plus complexes tels que la nage. D'autres encore sont impliquées dans des fonctions élaborées telles que l'apprentissage, la mémoire et la prise de décision (voir l'encadré page 26).

Deux lobes dits optiques, situés dans l'axe des yeux, sont impliqués dans de nombreux comportements déclenchés par la vision. Leur taille – deux tiers du volume du cerveau – souligne l'importance des informations visuelles dans la vie des céphalopodes.

La réglementation animale

Les réglementations sur l'utilisation des animaux en expérimentation sont apparues dans certains pays européens (Danemark, Allemagne, Angleterre) au XIX^e siècle. Ce type de régulation s'est étendu dans toute l'Europe, à différents degrés en fonction des pays, jusque dans les années 1980.

C'est en 1986 que la première réglementation paneuropéenne concernant le bien-être des animaux de laboratoire a été appliquée. Cette réglementation concernait les animaux vertébrés, en particulier les rongeurs et les lapins qui constituent environ 80 pour cent des animaux utilisés en laboratoire. Cette directive a été remaniée en 2010 et 2013.

Le chercheur doit à présent mettre tout en œuvre pour optimiser le bien-être des animaux de laboratoire, réduire leur nombre et proposer des méthodes expérimentales alternatives (recherche sur des tissus en culture, modélisation informatique...). Les projets d'expériences sont classés sur une échelle de gravité pour l'animal (inconfort, douleur...) qui doit être

compatible avec l'importance des finalités de la recherche. Les établissements d'expérimentation doivent être agréés par les services vétérinaires compétents. Avant d'être réalisés, chaque protocole expérimental doit être expertisé et validé par des comités d'éthique composés de chercheurs, de membres de la société civile, de vétérinaires et de spécialistes du droit. Des instances de contrôle sont mises en place dans les différents centres de recherche et avec les services vétérinaires compétents pour s'assurer de la conformité des protocoles au cours de leur réalisation.

Un des comportements d'origine visuelle les plus étonnants des céphalopodes est le changement instantané de coloration de la peau en fonction de l'environnement, qui en fait des maîtres du camouflage.

La production de couleurs est fréquente dans le règne animal. Certaines espèces, tel le poisson-grenouille *Antennarius pictus*, se fondent parfaitement dans l'environnement; d'autres animaux, tels que le zèbre, la panthère, l'abeille, le tigre et de nombreux poissons et papillons, portent des motifs géométriques qui trompent leurs proies ou leurs prédateurs en brouillant leur silhouette générale; d'autres encore, tel le poisson scorpion *Pterois volitans*, arborent des couleurs vives qui avertissent d'éventuels prédateurs de leur grande toxicité ou, par exemple chez le paon (*Pavo cristus*), permettent de communiquer avec les congénères, notamment au cours des parades nuptiales. Grâce aux capacités uniques de leur peau, les seiches, poulpes et calmars font tout cela à la fois.

Leur peau est une toile de peintre – une couche de cellules blanches, les leucophores – sur laquelle des millions de cellules contractiles et pigmentées, les chromatophores, sont disposées géométriquement. Par contraction ou dilatation, ces cellules peuvent disparaître ou former de petites taches jaunes, orange, brunes ou noires (voir la figure 2). En fonction des espèces et de leur milieu

de vie, d'autres couleurs sont présentes, telles que le bleu chez la pieuvre à anneaux bleus *Hapalochlaena lunulatus* ou le rouge chez la seiche *Sepia elongata*. La contraction et la coordination de l'activité de ces cellules sont directement commandées par le cerveau. En se contractant ou en se dilatant ensemble, les chromatophores «dessinent» en une fraction de seconde des motifs plus ou moins géométriques, parfois spectaculaires, surtout sur la face dorsale de l'animal.

Entre les leucophores et les chromatophores se situe une couche de cellules particulières, les iridophores. Chaque iridophore présente des centaines de plaques réfléchissantes. En fonction des conditions environnementales, tous ces miroirs microscopiques produisent des irisations ou polarisent la lumière, c'est-à-dire modifient la vibration des ondes lumineuses (voir l'encadré page 28). Ces jeux de lumière sont très intenses. Par exemple, les iridescences sur la face ventrale d'une seiche (*Sepia officinalis*) rendent l'animal difficilement discernable de la surface de l'eau par des prédateurs ou des proies qui se trouveraient sous lui.

Par tous ces mécanismes, les seiches, pieuvres et calmars se camouflent en imitant la couleur et la structure du fond sur lequel ils reposent (voir la figure 3). Même leurs bras sont mis à contribution: en 2012, Alexandra Barbosa, du Laboratoire de

biologie marine de Woods Hole, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les seiches utilisent des indices visuels pour positionner leurs bras parallèlement aux motifs longilignes. Elles peuvent ainsi se fondre parmi des algues, par exemple.

Le camouflage n'est pas leur seule arme. Pour intimider ou tromper ses prédateurs, une seiche peut faire apparaître deux ocelles noirs menaçants à l'arrière de son corps. Les motifs de coloration sont aussi utilisés comme moyen de communication avec les congénères chez les espèces grégaires ou comme signal de qualité au partenaire de reproduction. Chez la seiche commune *Sepia officinalis* et la seiche du pacifique *Sepia latimanus*, par exemple, des zébrures produites par les mâles attirent les femelles.

Devant tant de motifs colorés possibles décrits chez le calmar, la seiche et la pieuvre, difficile d'imaginer que ces maîtres dans l'art du camouflage ne distinguent pas... les couleurs. C'est pourtant bien le cas. En 1981, John Messenger, de l'Université de Sheffield, en Angleterre, a montré que leur rétine ne présente qu'un

seul type de pigment, la rhodopsine, alors qu'au moins deux sont nécessaires à la vision des couleurs. Plus tard, en 2006, Lydia Mäthger, du Laboratoire de biologie marine de Woods Hole et ses collègues en ont apporté la preuve comportementale. Ils ont placé des seiches sur un damier constitué de carrés jaunes et bleus ayant la même intensité lumineuse en niveau de gris (photographié en noir et blanc, le damier apparaît uniforme) : les seiches ont alors arboré la même coloration uniforme (couleur sable) que sur un fond uniformément bleu ou jaune. En revanche, sur un damier noir et blanc, elles présentaient un motif symétrique à deux couleurs (blanc et noir) imitant le damier.

Voir l'invisible

Les mécanismes de perception et de production des motifs colorés sont encore mal connus. Quant aux mécanismes cognitifs intervenant dans le choix, les apprentissages et la mémorisation des motifs colorés à arborer en fonction des contraintes de l'environnement, ils sont encore très peu

explorés. Les motifs de coloration eux-mêmes sont étudiés, car ils permettent d'avoir un accès direct à la perception de l'environnement par l'animal : ils constituent une sorte de système d'imagerie cérébrale naturel ouvrant une fenêtre sur le fonctionnement du cerveau des céphalopodes.

Si les céphalopodes ne voient pas les couleurs, ils ont néanmoins une vision exceptionnelle qui leur permet de distinguer d'autres propriétés des éléments qui les entourent : leurs yeux sont sensibles à la polarisation de la lumière.

La vision en milieu aquatique est très différente de celle en milieu aérien. Les couleurs sont atténuées avec la profondeur : plus on s'enfonce et plus les ondes lumineuses sont absorbées. À partir de quelques mètres de la surface, le jaune, l'orange et le rouge disparaissent ; à 50 mètres, le violet et le vert s'éteignent à leur tour, et seul le bleu reste visible. La présence de particules, de surfaces transparentes ou d'obstacles réfléchissants modifie aussi la lumière incidente et, par conséquent, la perception visuelle. En effet, quand la lumière traverse une surface transparente ou arrive sur une surface

LE SYSTÈME NERVEUX DES CÉPHALOPODES

Le système nerveux des céphalopodes – ici une seiche – est constitué d'un « cerveau » (en jaune), et d'un système nerveux « périphérique » (en rose), constitué notamment d'un ganglion stellaire d'où rayonnent des fibres nerveuses géantes. Celles-ci se ramifient en de nombreuses terminaisons qui contrôlent les muscles du manteau et les mouvements des nageoires. Un système de cellules

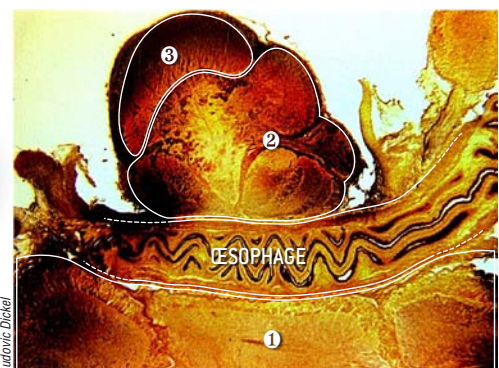
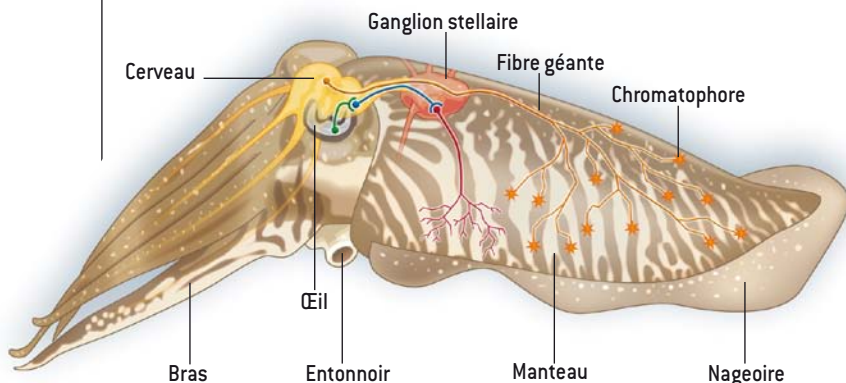
contractiles et pigmentées – les chromatophores – réparties sur le manteau, la tête et les tentacules de l'animal est directement contrôlé par le cerveau via des fibres nerveuses qui traversent le ganglion stellaire.

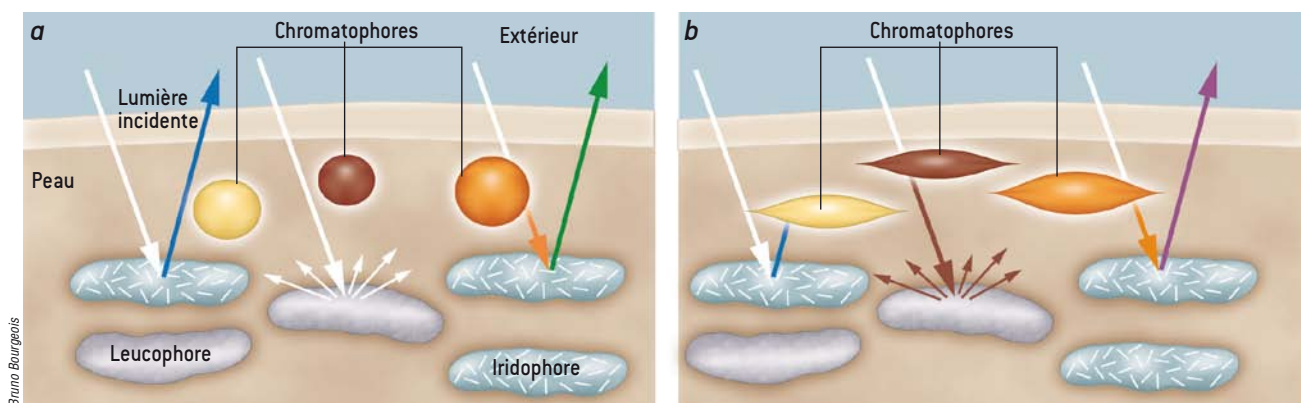
Le cerveau (à droite, coupe longitudinale du cerveau d'une seiche) est fonctionnellement très hiérarchisé. Les structures sous l'œsophage (1) sont impliquées dans l'intégration primaire des

informations sensorielles et la production de réponses motrices simples (comme la moelle épinière des vertébrés). Les structures de part et d'autre et au-dessus de l'œsophage (2) intègrent des informations de différents systèmes sensoriels et coordonnent des séquences comportementales plus complexes (nage, maintien de l'équilibre). Les structures les plus dorsales (3) sont impliquées dans

des fonctions élaborées telles que l'apprentissage, la mémoire et la prise de décisions (comme l'hippocampe ou le cortex préfrontal chez les mammifères).

Derrière les yeux, les lobes optiques intègrent toutes les informations visuelles ; ils jouent un rôle dans de nombreux comportements d'origine visuelle, tels que les changements de coloration de la peau ou certains apprentissages visuels.





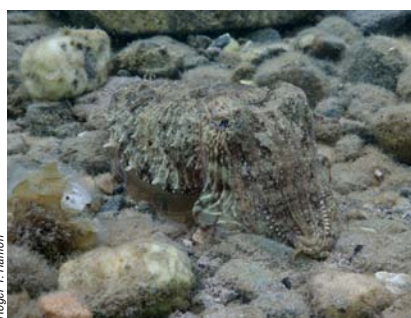
2. LA PEAU DES CÉPHALOPODES (ci-contre celle d'une seiche *Sepia officinalis* vue à la loupe) contient trois types de cellules qui modulent sa couleur : les chromatophores, les leucophores et les iridophores. Les chromatophores, qui contiennent des pigments de diverses couleurs (ici jaune, orange, marron), dessinent divers motifs en une fraction de seconde selon qu'ils se contractent (a) ou se dilatent (b). Ils filtrent aussi la lumière qui les traverse. Les leucophores, blancs, diffusent la lumière incidente dans toutes les directions, ce qui augmente l'intensité de la couleur correspondante. Les iridophores portent à leur surface de petites plaques réfléchissantes orientées aléatoirement, ce qui influe sur la couleur de la lumière.



réfléchissante, elle se polarise (voir l'encadré page 28). La structure particulière de leur rétine permet aux céphalopodes de percevoir cette propriété de la lumière à laquelle nous sommes insensibles. Là où un plongeur ne verra que scintillements, la seiche, elle, distinguera des poissons argentés ou des crevettes transparentes. Capables de détecter ces signaux lumineux depuis leur plus jeune âge, les seiches rendent le camouflage de ces proies inopérant. Percevoir la polarisation de la lumière ajoute une nouvelle dimension à la vision, analogue à l'ajout des couleurs à une image en noir et blanc.

En 2012, nous avons montré que la sensibilité à la polarisation de la lumière permet aussi aux seiches de s'orienter dans l'espace à l'instar de nombreuses espèces d'insectes. Placées dans un labyrinthe en Y, les seiches retrouvent un abri situé à l'extrémité d'un bras aussi bien à l'aide de balises visuelles (des « panneaux de signalisation » noirs et blancs indiquant le bon ou le mauvais chemin) que de la direction de la polarisation lumineuse.

Le développement de cette sensibilité semble dépendre de l'environnement dans lequel évolue l'animal : nous avons montré, en collaboration avec Nadav Shashar, de l'Université Ben Gourion, en Israël, que la seiche commune *Sepia officinalis*, que l'on trouve dans la Manche, perçoit des stimulus lumineux polarisés même dans une eau turbide, contrairement aux seiches vivant dans les eaux claires de la mer Rouge (*Sepia pharaonis*). Enfin, la vision de la lumière



3. DES SEICHES *Sepia officinalis* se fondent dans chacun de ces fonds marins.

Les trouvez-vous ? En haut, la seiche arbore un motif uniforme, imitant le duvet de mousse qui recouvre les pierres. En bas, deux seiches ont opté pour des motifs aux contours bien délimités, qui se confondent mieux avec les éléments contrastés du fond.

polarisée permettrait aux seiches de communiquer. Les seiches polarisent elles-mêmes la lumière via les iridophores présents sur leurs bras et sur leur tête. Nous pensons qu'il s'agit de signaux qui peuvent être échangés avec leurs congénères sans éveiller l'attention des prédateurs – une sorte de canal de communication crypté.

Le toucher joue aussi un rôle important. En mai 2014, Binyamin Hochner, de l'Université hébraïque de Jérusalem, et ses collègues ont montré que le poulpe présente un système de reconnaissance chimique de soi qui empêche ses ventouses de se coller à sa propre peau, et ainsi de faire des nœuds avec ses bras.

Imitation et tromperie

Si l'on est ici encore loin d'avoir montré que le poulpe a une « conscience de soi », les céphalopodes présentent une forme d'intelligence qu'illustrent leurs comportements. À l'instar des grands singes ou des corvidés (corbeaux, corneilles), ils sont capables d'utiliser des outils, de manier la duperie ou encore de faire preuve de comportements surprenants. Au cours de plusieurs centaines d'heures de plongée effectuées entre 1999 et 2008, Julian Finn et Mark Norman, du Muséum Victoria, à Melbourne en Australie, et Tom Tregenza, de l'Université d'Exeter, en Angleterre, ont fait des observations étonnantes. Ils ont filmé plusieurs spécimens d'un petit poulpe, *Amphioctopus marginatus*, qu'ils ont surnommé poulpe-noix de coco : l'animal

déambulait dans les eaux indonésiennes à cheval sur deux demi-noix de coco. Le poulpe les utilise comme refuge en cas de danger dans un environnement hostile. Dans l'archipel malais, les biologistes ont aussi observé un poulpe « imitateur », *Thaumoctopus mimicus*, qui se fait passer tantôt pour un poisson plat, tantôt pour une rascasse ou encore pour un serpent de mer. L'imitation n'est pas anodine, car tous ces modèles renferment de puissants venins, ce qu'ils ne manquent pas de signaler en arborant des rayures noires et blanches ostentatoires.

La tromperie peut aussi être destinée à des individus de la même espèce. En Australie, Roger Hanlon, du Laboratoire de biologie marine de Woods Hole, et ses collègues ont observé en milieu naturel que les petits mâles de l'espèce *Sepia apama* trompent les mâles plus gros qui montent la garde auprès des femelles en imitant la coloration des femelles. Cette stratégie de duperie est payante près d'une fois sur deux.

En matière de tromperie, le mâle d'une autre espèce australienne, *S. plangon*, est encore plus fort. Des observations en milieu naturel dans le port de Sydney, ainsi qu'en

laboratoire par Culum Brown, de l'Université Macquarie (Sydney), et son équipe ont montré que les seiches mâles sont capables d'arborer d'un côté de leur corps une coloration typique de femelle face à un rival, tandis qu'ils font la cour à une femelle de l'autre côté, en arborant des couleurs de mâle. Cette tactique est utilisée seulement quand un seul rival est présent, la duperie risquant d'être découverte en présence de plusieurs mâles.

Innovants et joueurs

De telles stratégies de duperie, décrites chez certains oiseaux et mammifères, sont associées à des capacités cognitives élaborées. Il est probable que les comportements sociaux soient un des moteurs de l'évolution et du développement des capacités cognitives chez certains céphalopodes, mais pas seulement. Les capacités d'innovation sont aussi des facteurs corrélés à l'intelligence et à la taille relative du cerveau, et divers comportements innovants ont été décrits chez les poulpes et les seiches. En 2012, par exemple, une photographe amateur a été témoin de l'attaque d'un goéland par un poulpe de près d'un mètre de long (*Enteroctopus dofleini*) dans le port de Victoria, au Canada. Le poulpe a eu raison de l'oiseau en quelques minutes. Ce comportement était innovant, car il n'était pas adopté par tous les membres de l'espèce.

Un autre comportement associé au développement cognitif, principalement chez les oiseaux et les mammifères, mais aussi chez quelques rares poissons et reptiles, est le jeu. Récemment, des comportements de jeu ont été observés chez la pieuvre, notamment par Jennifer Mather, de l'Université de Lethbridge, au Canada, et par Michael Kuba, de l'Université de Jérusalem. Les pieuvres montrent de la curiosité envers des objets nouveaux (de petits cubes en plastiques), se dirigent vers eux, les prennent et les manipulent en les faisant passer d'un bras à l'autre.

Une des particularités des céphalopodes est l'absence de soins parentaux directs aux jeunes. Sauf chez quelques rares espèces tel le nautilé, qui vit 20 ans, les individus de différentes générations ne se rencontrent jamais, car les mâles et les femelles meurent après leur unique et intense saison de reproduction. Comment s'en sortent les jeunes ? Notre équipe est spécialisée dans l'étude de la cognition

BIBLIOGRAPHIE

L. Cartron et al., **Maturation of polarization and luminance contrast sensitivities in cuttlefish (*Sepia officinalis*)**, *J. Exp. Biol.*, vol. 216, pp. 2039-2045, 2013.

J. K. Finn et al., **Defensive tool use in a coconut-carrying octopus**, *Current Biology*, vol. 19, pp. R1069-R1070, 2009.

L. M. Mäthger et al., **Anatomical basis for camouflaged polarized light communication in squid**, *Biology Letters*, vol. 2, pp. 494-496, 2006.

L. Bonnaud et R. Boucher-Rodoni, **Une communication aux motifs changeants**, *Dossier Pour la Science*, n° 34, pp. 18-25, 2002.

Ce que voient les céphalopodes

Les animaux qui distinguent les couleurs sont sensibles à différentes parties du spectre lumineux : la lumière peut être représentée par un ensemble d'ondes électromagnétiques caractérisées chacune par une longueur d'onde, dont les yeux distinguent certaines composantes.

Les céphalopodes ne sont pas sensibles aux longueurs d'onde, mais à la polarisation de la lumière. Une onde lumineuse est caractérisée par deux composantes : un champ magnétique et un champ électrique, représentés par deux vecteurs oscillant dans un plan perpendicu-

laire à la direction de propagation de l'onde. La polarisation caractérise la direction dans laquelle oscille le champ électrique. Le champ électrique d'une lumière non polarisée oscille dans toutes les directions. S'il garde une direction fixe, la polarisation est linéaire. S'il tourne autour

de l'axe de propagation, la polarisation est circulaire.

La lumière du Soleil n'est pas ou très peu polarisée. En revanche, elle se polarise quand elle frappe une surface réfléchissante (la surface d'eaux calmes, des plumes mouillées, des écailles de poisson), quand elle est dispersée par des particules ou quand elle traverse une surface transparente, telle une crevette translucide (à gauche). Une seiche distingue ainsi l'animal (à droite, vu avec des filtres polarisés imitant la vision de la seiche).



Maday Shashar



4. UNE SEICHE MÂLE *Sepia plangon* (à droite) est capable de présenter une coloration attrayante pour une femelle sur un côté et, face à un rival (non montré), d'imiter une femelle sur l'autre côté. Le rival, alors, ne l'attaque pas.



5. DANS L'ŒUF, quelques semaines avant l'éclosion, l'embryon de seiche (ici d'une espèce indonésienne) est une seiche miniature qui voit à travers la membrane et apprend.

périnatale chez la seiche. Depuis une dizaine d'années, l'une de nous (A.-S. Darmaillacq) s'intéresse ainsi aux capacités d'apprentissage précoce. Longtemps, on a cru que les jeunes découvraient le monde après la naissance, mais de nombreuses observations récentes montrent qu'au contraire, les stimulations extérieures sont perçues très tôt dans l'œuf par les embryons de seiche.

Un apprentissage... dans l'œuf

En 2008, A.-S. Darmaillacq a mis en évidence que, quelques semaines avant l'éclosion, environ deux mois après la ponte, les embryons de seiche voient leur environnement à travers la capsule de l'œuf : des seiches qui ont perçu des proies avant l'éclosion ou dans les heures qui l'ont suivie orientent leur préférence vers ces proies, même s'il ne s'agit pas de leur préférence innée. Cet apprentissage, nommé « empreinte alimentaire », permet aux jeunes seiches de ne pas choisir leur proie en faisant des essais au hasard, ce qui pourrait être risqué, mais d'orienter leur choix en fonction des proies disponibles et donc de s'adapter tôt et vite à d'éventuels changements de l'environnement.

L'apprentissage des proies est lui-même élaboré. L'un de nous (L. Dickel) a montré que la perception des proies est d'une grande précision : les seiches les distinguent sur la base de leur contraste ou de leur forme ; elles élaborent aussi des catégories perceptives « crabes » versus « crevettes » et généralisent les caractéristiques apprises

à des proies ressemblantes, en regroupant dans la même catégorie des crabes blancs et des crabes noirs, par exemple.

Les seiches et poulpes adultes sont aussi capables d'apprendre des tâches aussi diverses que s'orienter dans l'espace, ne plus tenter de capturer une proie inaccessible ou au goût désagréable ou encore distinguer des formes ou des textures différentes. Les informations acquises dans ces apprentissages peuvent être retenues sur plusieurs jours consécutifs, signe d'une bonne mémoire à long terme.

Ces découvertes ont toutes contribué à faire connaître les céphalopodes. De monstres insaisissables, ces animaux ont acquis, en Europe du moins, le statut d'êtres sensibles à la douleur physique et psychologique. La révolution des pratiques de la recherche est le signe de l'évolution rapide de la relation de l'homme à l'animal sous toutes ses formes et plus seulement celles qui lui ressemblent. Et la question se posera vite sur la réglementation des pratiques associées à l'exploitation industrielle de ces animaux, telles que la pêche ou l'aquaculture.

Les céphalopodes doivent-ils être considérés comme les seuls invertébrés « sensibles » ou comme les premiers invertébrés ainsi qualifiés ? Les connaissances sur la cognition ou la perception de la douleur avancent vite sur d'autres mollusques, sur l'abeille ou certains crustacés. L'usage de ces modèles est déjà réglementé dans plusieurs pays (Nouvelle-Zélande, Australie, Canada, Norvège...). Certains disent que cette réglementation va trop loin, d'autres prétendent au contraire que le respect de l'animal quel qu'il soit doit passer avant

la recherche scientifique. Signe des temps, ces débats, jusque-là anecdotiques bien que passionnés, émergent maintenant au niveau du législateur et du chercheur. Dans plusieurs pays européens, des laboratoires travaillant sur les céphalopodes ont commencé des recherches pour combler le manque de connaissance sur le bien-être de ces animaux (douleur, anesthésie, effets des conditions d'élevage, stress...). Car pour une fois, la loi est allée plus vite que la science !

En 1991, un groupe de travail de l'Institut britannique d'éthique médicale a proposé six critères pour considérer qu'un animal ressent de la douleur physique. Deux d'entre eux sont avérés chez les céphalopodes : ces animaux ont un cerveau très développé et répondent de façon persistante à des stimulations potentiellement douloureuses. En revanche, la présence des quatre autres critères n'est que « probable » : récepteurs à la douleur, voies nerveuses directes conduisant les informations douloureuses de ces récepteurs au cerveau, récepteurs aux substances opioïdes (système antidouleur endogène) et efficacité d'analgésiques qui atténuent la douleur chez les autres espèces.

La douleur psychologique et la « conscience » sont plus difficiles à évaluer. Elles sont au cœur des études de certains chercheurs, tels que J. Mather, ou David Edelman, de l'Institut des neurosciences de San Diego. Néanmoins, les faits sont déjà là : les krakens monstrueux des Victor Hugo, Jules Verne et autres romanciers du XIX^e siècle ont laissé la place à des êtres sensibles, joueurs et intelligents. ■

Le Silicène

sur les traces du graphène

Le silicène est un nouveau matériau constitué d'une unique couche d'atomes de silicium. Parce qu'il allie les caractéristiques de cet élément et les propriétés électroniques du graphène, il pourrait conduire à de nombreuses d'applications.

Un diamant ne ressemble guère à une mine de crayon, l'un est rare et cher, l'autre banal et bon marché. Pourtant, ils sont tous deux composés d'un seul type d'atomes : le carbone. Seul diffère l'agencement des atomes de carbone, c'est-à-dire la structure cristalline. L'exemple est bien connu, mais illustre qu'une simple différence de structure cristalline suffit à conférer aux matériaux des propriétés optiques, mécaniques, de conduction électrique ou thermique spécifiques. Comme le diamant et le graphite des mines de crayon – deux formes dites allotropes du carbone –, de nombreux éléments chimiques présentent plusieurs formes cristallines. L'étain, par exemple, existe sous forme d'étain « blanc », le métal usuel. Quand la température est inférieure à -50°C , il se transforme en étain « gris » semi-conducteur et pulvérulent.

Il est assez rare de découvrir de nouveaux allotropes. Pour le carbone, on se souvient de la découverte par Harry Kroto, Robert Curl et Richard Smalley du fullerène, une molécule quasi sphérique constituée

de 60 atomes de carbone. Ces chimistes ont reçu le prix Nobel de chimie en 1996 pour cette découverte. Les fullerènes ont trouvé de nombreuses applications en chimie notamment.

En 2004, un autre allotrope du carbone a suscité l'émotion : le graphène. Dans ce matériau, les atomes de carbone adoptent une structure hexagonale plane, en nid d'abeilles, et forment une monocouche atomique : c'est un matériau bidimensionnel. Les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov, de l'Université de Manchester, l'ont obtenu par exfoliation d'un cristal de graphite : ils ont détaché les couches d'atomes de carbone les unes après les autres à l'aide d'un ruban adhésif et ont fini par obtenir un feuillet constitué d'une unique couche d'atomes de carbone. Leurs « expériences particulièrement innovantes » sur ce matériau bidimensionnel ont valu à leurs inventeurs le prix Nobel de physique en 2010.

Le graphène présente des propriétés exotiques, donnant lieu à des phénomènes

Guy Le Lay